

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139:624.15

УЧЕТ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Г. П. Пустовойт

Московский государственный университет, геологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия

В Строительных Нормах и Правилах (СНиП) влияние случайных факторов на устойчивость сооружений, возводимых на многолетнемерзлых породах, учитывается коэффициентом надежности. Этот коэффициент вносит в расчет основания некоторый запас прочности, призванный обеспечить его устойчивость вопреки неблагоприятным случайным воздействиям, прежде всего климатическим. Однако степень обеспеченности не может быть оценена при детерминистическом подходе, и коэффициент надежности вычислить невозможно, поэтому он назначается „волевым“ порядком, исходя из опыта проектирования. Вероятностный подход дает количественную меру гарантии устойчивости оснований — уровень безопасности — и позволяет связать его с коэффициентом надежности, функциональной зависимостью, а значит, и рассчитать коэффициент. В статье предложен метод его расчета, который может быть легко включен в СНиП в качестве дополнения к соответствующему пункту. Метод позволяет учесть и тренды температуры из-за глобальных изменений климата.

Вечномерзлые грунты, надежность, риск, оптимизация, изменения климата

ACCOUNT OF CLIMATIC CHANGE IN THE DESIGN OF THE BASES OF STRUCTURES ON PERMAFROST SOILS

G. P. Pustovoit

Moscow State University, Department Geology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

In the government design standards (SNiP) permafrost bases of structures tolerance for random factors is described in terms of coefficient of reliability. This coefficient has to provide a safety margin under adverse random effect on the frozen base (the climatic factor first). But it is impossible to evaluate the degree of safety and to calculate the coefficient of reliability, so it is set from the previous design experience. Alternatively, probability approach results in the quantitative characteristic of the degree of safety and gives its functional relationship with the coefficient of reliability, and now we are able to calculate this coefficient. We have worked out calculation procedure which can be added to the design standards. This procedure permits to take into account both random temperature variations and its regular global changes.

Permafrost, reliability, risk, optimization, climatic change

Строительные свойства вечномерзлых грунтов (ВМГ) в значительной степени определяют их температурным режимом, представляющим собой процесс, развивающийся во времени и подверженный случайным воздействиям, поэтому изменения несущей способности и деформации оснований также являются случайными процессами, а их стохастические свойства и фактор времени оказывают решающее влияние на устойчивость зданий и сооружений. Методика расчета оснований по предельным состояниям, нормированная в Строительных Нормах и Правилах (СНиП), создана на основе опыта строительства на талых грунтах и не учитывает названных факторов. Для применения ее к расче-

там вечномерзлых оснований последние необходимо рассматривать с позиций теории надежности изменяющихся систем, для которых фактор времени принципиально важен и не может быть учтен введением каких-либо единых коэффициентов, задающих доверительные границы для тех или иных параметров.

Количественное описание надежности дается функцией, значение которой в любой фиксированный момент времени t равно вероятности того, что время безотказной работы системы будет больше t . При этом под безотказностью понимается выполнение условий предельных состояний, чем обеспечивается преемственность вероятностных методов расчета по отношению к

теории предельных состояний и методам расчета по СНиП. Общее определение функции надежности дано в [Хрусталева и др., 1988]. При сохранении вечномерзлого состояния грунтов основания (принцип I) распределение числа отказов подчиняется закону Пуассона и функция надежности может быть представлена в виде:

$$P(t, \gamma) = \exp \left\{ -\int_0^t m[\gamma(\tau)] d\tau \right\} = \exp[-tm(\gamma)], \quad (1)$$

где t — время, лет; последнее равенство справедливо при отсутствии глобальных изменений климата, когда $\gamma = \text{const}$; $m(\gamma)$ — математическое ожидание числа отказов за единицу времени; вид этой функции определяется видом распределения и спектральными характеристиками случайного теплового процесса в основании и периодической составляющей; для вечномерзлых оснований мы нашли эту функцию и привели ее к следующему виду:

$$m(\gamma) = \exp(-\gamma^2/2) / (\gamma \sqrt{2\pi}), \quad (2)$$

где γ — характеристика безопасности — отношение запаса прочности (например, несущая способность минус нагрузка) к среднему квадратическому отклонению этого запаса.

Характеристика безопасности, с одной стороны, полностью определяет надежность системы, с другой — связана простой функциональной зависимостью с коэффициентом надежности. Согласно СНиП этот коэффициент вносит в расчет основания некоторый запас прочности, призванный обеспечить его устойчивость вопреки неблагоприятным случайным воздействиям, прежде всего климатическим. Однако степень обеспеченности не может быть оценена при детерминистическом подходе, и коэффициент надежности вычислить невозможно, поэтому он назначается „волевым“ порядком, исходя из опыта проектирования. В СНиП этот коэффициент „расщепился“ на несколько поразному называемых и независимо назначаемых коэффициентов. Поэтому в дальнейшем мы будем говорить о коэффициенте запаса, понимая под ним комбинацию всех упомянутых назначаемых коэффициентов. Связь коэффициента запаса K с характеристикой безопасности дается формулой:

$$K = 1/(1 - V_\gamma), \quad (3)$$

где V — коэффициент вариации несущей способности (см. ниже).

Возможность расчета коэффициента запаса как раз и служит тем „разъемом“ (или интерфейсом), через который вероятностные методы легко подключаются к СНиП, так как рассчитанное значение коэффициента запаса просто под-

ставляется в условие предельного состояния, не нарушая принятого порядка расчетов.

Расчет названных величин требует решения трех взаимосвязанных задач: во-первых, дать формальное математическое описание системы „фундамент-основание“ в виде оператора, переводящего входные воздействия на нее в выходную величину — несущую способность, во-вторых, описать стохастическое поведение системы, когда входные и выходные величины являются случайными процессами, в-третьих, в целях практической применимости результатов упростить сложные зависимости, придав им вид расчетных формул, таблиц, графиков.

При решении первой задачи в основу положены расчетные схемы и формулы СНиП, связывающие несущую способность с параметрами теплового режима и прочностными характеристиками ВМГ. Вторая задача решена методами математической теории случайных процессов и их выбросов; при этом учтена сезонная и случайная изменчивость не только несущей способности, но и нагрузок на основание. В результате решения третьей задачи получен представленный здесь метод расчета. Поскольку изменчивость нагрузок играет второстепенную роль и для капитальных зданий может вообще не учитываться, мы опустим соответствующие члены в расчетных формулах, чтобы не отвлекаться от главного.

Расчет коэффициента вариации несущей способности существенно зависит от способа фундаментостроения и типа охлаждающей системы. Здесь мы рассмотрим самый распространенный способ (с сохранением вечномерзлого состояния грунтов) и тип системы (вентилируемое подполье). В этом случае имеем:

$$V = \frac{0,9(-T_0'/A)^{1/3}\sigma W}{-2T_{m,e} - C\sqrt{-T_{m,e}}}, \quad (4)$$

где $T_{m,e}$, T_0' — расчетные температуры ВМГ, определяемые по указаниям СНиП; σ , A — среднее квадратическое отклонение среднегодовой температуры воздуха и амплитуда ее сезонных колебаний; W — коэффициент затухания случайных колебаний температуры с глубиной, представленный в виде таблицы; C — коэффициент, зависящий от типа фундамента и от вида грунта, представленный в виде таблицы.

Как найти вторую величину, входящую в выражение (3) — характеристику безопасности? Мерой устойчивости сооружения служит уровень надежности — значение функции надежности в конце нормативного срока эксплуатации сооружения (т. е. вероятность безотказной работы в течение всего этого срока). Более наглядный показатель — уровень риска — дополнение уровня надежности до единицы, т. е. вероятность

отказа. Каким должен быть этот уровень? Для сооружений с высокой степенью ответственности (с моральной ответственностью) он может быть задан (нормирован) как исходный параметр. В этом случае характеристика безопасности определяется из выражений (1) и (2). В общем же случае ее следует определять из решения оптимизационной задачи, где минимизации подлежат суммарные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию сооружения, включая цену риска, которая выражается через функцию надежности. Формула для расчета оптимального значения характеристики безопасности приводится к виду:

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln [(5 - 65/t_e)/EV]} - 2V, \quad (5)$$

где t_e — длительность срока эксплуатации, лет; E — обобщенный экономический коэффициент, определяемый как отношение удельной стоимости создания несущей способности (цена 1 ньютона) к стоимости сооружения, приходящейся на единицу его веса.

Подставляя значение (5) в выражение (3), получаем оптимальное значение коэффициента запаса. Как видим, оно зависит от очень многих факторов: климатических, грунтовых, от назначения и стоимости сооружения и длительности его эксплуатации, типа и глубины заложения фундаментов, стоимости производства работ. Выявляется и характер основных зависимостей.

Так, с ростом стоимости сооружения и длительности эксплуатации, согласно (5) и (1), растет оптимальный уровень надежности, а вместе с ним и коэффициент запаса. То есть для более дорогого сооружения, возводимого на более длительный срок, экономически выгоден больший запас прочности, обеспечивающий более высокую надежность (например, в условиях Воркуты при прочих равных: для 12-этажного жилого здания $K = 1,8$, для 5-этажного — 1,6, для временного со сроком эксплуатации 20 лет — 1,4). Это вполне понятно, как и то, что в более холодных и стабильных климатических условиях оптимальный коэффициент запаса оказывается меньше (при прочих равных условиях 1,6 для Воркуты и 1,3 для Якутска).

Не столь очевидна зависимость от глубины заложения фундамента. С глубиной все колебания температуры затухают и коэффициент вариации V убывает, а значит возрастает оптимальное значение характеристики безопасности (и, конечно же, уровень надежности), но темп этого роста ниже, чем темп снижения коэффициента V , поэтому согласно (3) оптимальный коэффициент запаса снижается. Это можно проиллюстрировать следующим примером, рассчитанным в условиях Воркуты.

Длина свай, м	6	8	10
Коэффициент запаса	1,9	1,6	1,4
Несущая способность свай, %	62	100	144
Число свай, %	190	100	60
Объем бетона, %	142	100	75
Уровень надежности	0,975	0,985	0,991
Уровень риска	0,025	0,015	0,009

Как видим, с ростом глубины погружения свай сокращаются затраты труда и материалов при одновременном значительном повышении уровня надежности (риск уменьшился почти втрое), тогда как попытка повысить этот уровень путем увеличения числа свай привела бы к росту затрат. Причина в том, что в первом случае коэффициент вариации V уменьшается, во втором — нет. Заметим, что коэффициент V уменьшается и при понижении температуры ВМГ, приводя к тому же эффекту повышения надежности при сокращении затрат (в данном примере охлаждение ВМГ на 1° сокращает расход бетона на 15 % и уменьшает уровень риска почти вдвое).

Итак, экономически целесообразными мерами повышения устойчивости являются охлаждение ВМГ и увеличение глубины заложения фундаментов. Последнее указывает на преимущество свайных фундаментов перед столбчатыми и на целесообразность так проектировать конструкции зданий, предназначенных к строительству по принципу I, чтобы их можно было опирать на фундаменты с возможно меньшим числом элементов, создающих необходимую несущую способность за счет большой глубины погружения в ВМГ.

Предложенный метод расчета позволяет учесть и потепление климата, если оно не „слишком сильное“ (критерий дан ниже). С повышением температуры ВМГ несущая способность основания будет снижаться и в какой-то момент станет равной нагрузке от сооружения (будет „выбран“ весь запас прочности, заложенный в проект коэффициентом K). Этим „критическим“ моментом наиболее вероятного отказа основания определяется средняя долговечность. Критический момент (как и температуру ВМГ в этот момент) можно найти обычным расчетом по СНиП в каждом конкретном случае, задавшись определенным сценарием потепления.

Если критическое время t_c меньше срока эксплуатации сооружения t_e , будем говорить о „сильном“ потеплении; именно такой случай был исследован нами численными методами [Хрусталева и др., 1993]. Для применения к этому случаю аналитического метода расчета требуется его существенная переработка, которая сейчас ведется. Здесь же мы рассмотрим „слабое“ потепление ($t_c > t_e$).

Как показали расчеты, при линейном тренде температуры воздуха закон изменения характеристики безопасности практически не отличается от линейного:

$$\gamma(t) = (1 - t/t_c)\gamma_0, \quad (6)$$

где индексом „ноль“ обозначено оптимальное значение, рассчитанное без потепления.

Выражения (1), (2) и (6) описывают закон снижения надежности основания из-за глобального потепления и позволяют найти значение характеристики безопасности (а значит, и коэффициента запаса), которое требуется обеспечить в начальный момент. Это значение можно найти из следующего вполне понятного условия: при адекватном учете потепления уровень надежности должен остаться таким же, каким он был без потепления при оптимальном значении (5) характеристики безопасности, т. е.

$$P [t_e, \gamma(t)] = P (t_e, \gamma_0). \quad (7)$$

Подставив сюда (2) и согласно (6), сделав замену $dt = -(t_c/\gamma_0)d\gamma$, получим:

$$t_c \int_{\gamma_T - \gamma_0 t_e/t_c}^{\gamma_T} \exp(-\gamma^2/2)/\gamma d\gamma = t_e \exp(-\gamma_0^2/2), \quad (8)$$

где γ_T — искомое „требуемое“ значение. Замена переменной $\exp(-\gamma^2/2) = y$ приводит подынтегральное выражение к виду $dy/\ln y$, т. е. интеграл (8) сводится к хорошо известной специальной функции — интегральному логарифму, который при малых значениях своего аргумента хорошо приближается функцией $y/\ln y$. После логарифмирования, приведения подобных и отбра-

сывания малых членов получим начальное значение характеристики безопасности, требуемое в условиях потепления:

$$\gamma_T = \gamma_0 \left[1 + \frac{t_e}{t_c} + 2 \ln \left(1 - \frac{t_e}{t_c} \right) (t_e/t_c) / \gamma_0^2 \right]. \quad (9)$$

Подставив это значение в (3), найдем оптимальный коэффициент запаса, который требуется обеспечить с учетом будущего потепления.

В качестве примера мы рассчитали оптимальные значения коэффициента запаса для жилых зданий (срок эксплуатации 50 лет), возводимых по принципу I в условиях, характерных для района Воркуты, при различном темпе потепления (значения K без потепления взяты из приведенных выше примеров).

Темп потепления, град/г	Коэффициент запаса K для зданий:	
	5-этажного	12-этажного
0	1,6	1,8
0,02	1,8	2,0
0,03	2,0	2,3
0,04	2,2	2,7

Литература

- Хрусталева Л. Н., Пустовойт Г. П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1988, 253 с.
 Хрусталева Л. Н., Пустовойт Г. П. Надежность и долговечность оснований инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах в условиях глобального потепления климата // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993, № 3, с. 10—13.

Поступила в редакцию
30 мая 1997 г.